

**К РАСЧЕТУ ПЛОТНОСТИ И ПРОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ,
ПОЛУЧАЕМЫХ ПРЕССОВАНИЕМ НЕКОМПАКТНОГО МАТЕРИАЛА**

В промышленности все большее применение находят изделия, получаемые методом пластической деформации некомпактных сжимаемых материалов (порошков и гранул). Для проектирования технологических процессов полезен теоретический анализ способа деформирования, в котором плотность и прочность материалов выступают в качестве управляемых параметров. В данной работе на конкретном примере процесса прессования исследуется метод прогнозирования указанных параметров.

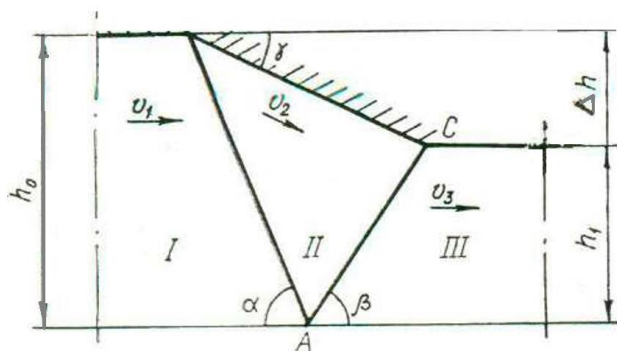


Рис. 1. Схема течения материала при прессовании.

Рассмотрим плоскую задачу прессования сжимаемого под действием гидростатического давления материала через коническую матрицу при отсутствии сил трения на ее поверхности. Для решения задачи воспользуемся некоторыми результатами, полученными в работах [1, 2] при исследовании

пластического течения сжимаемого материала.

Допустим, области I, II, III (рис. 1) представляют собой жесткие блоки, а деформация, сопровождающаяся изменением плотности материала, сосредоточена на линиях раздела блоков AB и AC. На границах блоков возможны разрывы как касательной, так и нормальной составляющих вектора скорости перемещений.

Зададим кинематически допустимые поля скоростей в областях I, II, III соответственно в виде

$$\begin{aligned} v_x &= v_1; v_y = 0; \\ v_x &= v_2 \cos \gamma; v_y = -v_2 \sin \gamma; \\ v_x &= v_3; v_y = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

С помощью кинематических соотношений в разрывах для сжимаемого материала [1] запишем зависимости между скоростями перемещений жестких блоков

$$v_2 = \frac{v_1}{\cos \gamma - \sin \gamma \tan \beta}; v_3 = \frac{v_1 (\cos \gamma + \sin \gamma \tan \alpha)}{\cos \gamma - \sin \gamma \tan \beta} \quad (2)$$

и разрывы нормальной и касательной составляющих скорости на линиях AB и AC соответственно

$$\begin{aligned} \Delta v_{n1} &= \frac{\tan \alpha \tan \beta - 1}{\tan \gamma - \tan \beta} v_1 \cos \alpha; \Delta v_{\tau 1} = \frac{\tan \alpha \tan \beta + 1}{\tan \gamma - \tan \beta} v_1 \sin \alpha; \\ \Delta v_{n1} &= \frac{\tan \alpha \tan \beta - 1}{\tan \gamma - \tan \beta} v_1 \cos \beta; \Delta v_{\tau 2} = \frac{\tan \alpha \tan \beta + 1}{\tan \gamma - \tan \beta} v_1 \sin \beta. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь скорости и их разрывы описаны с точностью до неизвестных параметров — углов α и β , причем один из них можно выразить через другой с помощью очевидного геометрического соотношения

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \gamma}{\omega \operatorname{tg} \beta - (1 - \omega) \operatorname{tg} \gamma}, \quad (4)$$

где $\omega = \frac{h_0 - h_1}{h_0}$ — степень деформации при прессовании.

На линиях разрыва скоростей интенсивность скоростей деформации сдвига и скорость объемной деформации сжимаемого тела записываются соответственно в виде

$$N_i = \frac{1}{\Delta n \sqrt{3}} \sqrt{4 \Delta v_{ni}^2 + 3 \Delta v_{\tau i}^2}; \quad \xi_i = \frac{\Delta v_{ni}}{\Delta n}, \quad (5)$$

где $i = 1, 2$ — номер линии разрыва;

Δn — толщина пластического слоя, в котором осуществляется разрыв скоростей.

В работе [3] был обоснован принцип одновременных возможных изменений напряженного и деформированного состояний для случая быстрого нестационарного значительного формоизменения сжимаемого материала с реономными свойствами. На основании этого рассматриваемая краевая задача может быть сведена к поиску минимума функционала, который для плоского медленного изотермического течения сжимаемого жестко-пластического материала при варьировании только деформированного состояния примет вид

$$I = \int_{S'} (T N' + \sigma \xi') dS, \quad (6)$$

где T — интенсивность касательных напряжений; σ — гидростатическое давление; $S' = L' \Delta n$ — варьруемая площадь очага деформации в двухмерной задаче (L' — варьруемая длина линии разрыва скорости);

N' и ξ' — варьруемые инварианты тензора скорости деформации.

Рассмотрим течение материала, обладающего деформационным упрочнением; предположим, что T и σ являются функциями степени объемной деформации ε , т. е.

$$T = T(\varepsilon); \quad \sigma = \sigma(\varepsilon). \quad (7)$$

В качестве эксперимента, в котором можно получить уравнения связи (7), рассмотрим прессование некомпактного материала в глухом контейнере (рис. 2). Напряженно-деформированное состояние при пренебрежении падением напряжений по высоте прессовки опишем следующим образом:

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h}; \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{zz} (1 + 2\chi); \quad T = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_{zz} (1 - \chi) \frac{h_0}{h}; \quad (9)$$

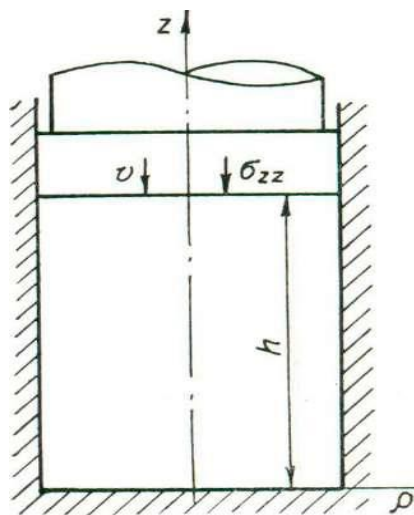


Рис. 2. Схема прессования некомпактного материала в глухом контейнере

$$\varepsilon = \ln \frac{h\rho_0}{\rho_0}, \quad (10)$$

где h_0 и h — высоты прессовки до и после деформации;

χ — коэффициент бокового давления;

σ_{zz} — удельное давление прессования;

ρ_0 и ρ — исходная и текущая плотности материала прессовки.

Н. Ф. Кунин и Б. Д. Юрченко предложили описывать связь между давлением прессования и плотностью материала экспоненциальной зависимостью [4]

$$\frac{\rho}{\rho_0} = a - b \exp(-c\sigma_{zz}), \quad (11)$$

где a , b , c — эмпирические коэффициенты.

Используя соотношения (9) - (11), выведем уравнения связи напряжений и деформаций в виде

$$T = \frac{1-\chi}{c\sqrt{3}} \ln \frac{b}{a-\exp\varepsilon}; \quad \sigma = \frac{1+2\chi}{3c} \ln \frac{b}{a-\exp\varepsilon}. \quad (12)$$

Значения χ и эмпирических коэффициентов a , b , c для ряда сжимаемых материалов представлены в таблице.

Данные для расчета технологических параметров

| Материал | ρ_0 , гс/см ³ | a | b | c , мм ² /кг | χ |
|----------------|-------------------------------|------|------|---------------------------|--------|
| Гранулы Al [5] | 1,5 | 1,80 | 0,80 | 0,120 | 0,52 |
| Порошки Cu [4] | 3,5 | 2,68 | 1,56 | 0,348 | 0,54 |
| Zn[4] | 2,8 | 2,95 | 1,76 | 0,408 | 0,41 |
| Fe[4] | 2,8 | 2,85 | 1,68 | 0,344 | 0,39 |

В областях II и III (см. рис. 1) приращение ε определяется по формуле

$$\Delta\varepsilon_i = \int_0^t \xi_i dt = \frac{\xi_i \Delta n}{\bar{v}_{ni}}, \quad (13)$$

где

t — время деформации;

$\bar{v}_{n1} = 0,5(v_1 \sin\alpha + v_{n1})$; $\bar{v}_{n2} = 0,5(v_3 \sin\beta + v_{n2})$ - средние нормальные составляющие скорости деформации.

Степени деформации на линиях разрыва скоростей найдем как

$$\varepsilon_1 = 0,5\Delta\varepsilon_1; \quad \varepsilon_2 = \Delta\varepsilon_1 + 0,5\Delta\varepsilon_2. \quad (14)$$

С учетом того, что на линиях разрыва скорости значения σ и T постоянны [1], произведем интегрирование в (6) и запишем условие минимума функционала

$$\sum_{i=1}^2 \left[T_i(\varepsilon_i) \frac{\partial(H_i L_i)}{\partial\beta} + \sigma_i(\varepsilon_i) \frac{\partial(\xi_i L_i)}{\partial\beta} \right] = 0, \quad (15)$$

где $L_1 = \frac{h_0}{\sin\alpha}$; $L_2 = \frac{h_0}{\sin\beta} (1 - \omega)$ — длины линий разрыва.

Точное аналитическое решение уравнения (15) невозможно, вследствие чего поиск корня производился численным методом с использованием ЭВМ «Наири-К».

С учетом данных таблицы для различных материалов в зависимости от ω получены значения среднего удельного давления прессования p и плотности материала на выходе из очага деформации ρ и рассчитанные соответственно по формулам

$$p = \frac{I_0}{h_0 v}; \rho = \rho_0 \exp(\varepsilon_1^0 + \varepsilon_2^0), \quad (16)$$

где I_0 — минимизированное значение функционала (6);

ε_1^0 и ε_2^0 — степени объемной деформации на линиях AB и AC , рассчитанные по формулам (14) при значениях β , сообщающих минимум функционалу (6).

Результаты расчета представлены на рис. 3.

Прочность материала после прессования можно определять по формуле, предложенной М. Ю. Бальшиным [6], в виде степенной зависимости от относительной плотности

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_{bk}} = \left(\frac{\rho}{\rho_k}\right)^m, \quad (17)$$

где m — постоянный для данного материала коэффициент;

σ_b и σ_{bk} — пределы прочности пористого и компактного материалов соответственно при плотностях ρ и ρ_k .

Применение изложенной методики позволяет прогнозировать физико-механические свойства изделий, получаемых прессованием из некомпактных материалов, а также рассчитывать технологические параметры процесса.

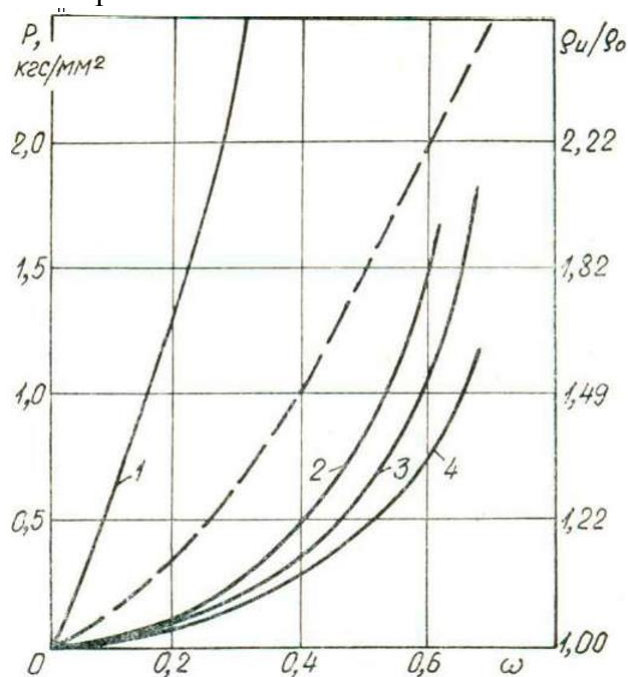


Рис. 3. Зависимости $p=p(\omega)$ (—) и

$$\frac{\rho}{\rho_0} = f(\omega) \text{ при } \gamma = 0,1:$$

1 — гранулы Al; 2 — порошок Cu; 3 — порошок Fe; 4 — порошок Zn

ЛИТЕРАТУРА

1. Дегтярев И. С., Колмогоров В. Л. «Журн. прикл. механики и техн. физики», 1972, № 5, 167.
2. Дегтярев И. С., Логинов Ю. Н., Колмогоров В. Л. «Технология легких сплавов», 1975, № 6, 24.
3. Колмогоров В. Л. Материалы VI Всесоюзной конференции по прочности и пластичности. М., 1975, с. 36.
4. Кунин Н. Ф., Юрченко Б. Д. «Порошковая металлургия», 1963, № 6, 3.
5. Северденко В. П., Иосифов В. Н. «Порошковая металлургия», 1970, № 12, 24.
6. Бальшин М.Ю. Порошковое металловедение. М., Металлургиздат, 1960.